

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INVESTIGAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DE UM
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

por

Douglas Ferreira Gonzaga

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Gonzaga, Douglas Ferreira
INVESTIGAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS
ALTERNATIVOS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO
FRONTAL DE ACABAMENTO DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 /
Douglas Ferreira Gonzaga. -- 2019.
25 f.
Orientador: Heraldo José de Amorim.

Coorientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Fresamento Frontal. 2. Aço AISI 304. 3. Métodos
Lubrirrefrigerantes. 4. Rugosidade Superficial. 5.
Forças de Corte. I. Amorim, Heraldo José de, orient.
II. Souza, André João de, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Douglas Ferreira Gonzaga

INVESTIGAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS DE
LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DE UM
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho.
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

DEDICATÓRIA

À toda minha família, em especial aos meus pais, meu irmão Henrique Ferreira Gonzaga e minha namorada Vanessa Amorim Rosa, por todo incentivo, amor e paciência ao longo de todo o percurso.

Ao professor orientador Dr. Heraldo José de Amorim, pela disponibilidade em todos os momentos, motivação e auxílio na realização deste trabalho.

Ao professor coorientador Dr. André João de Souza, pela ajuda na elaboração do tema do trabalho e pelas dúvidas esclarecidas durante a execução dos experimentos.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS Guilherme Vargas Schirmer, por todo auxílio e paciência na execução dos experimentos.

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas de corte

À empresa Eurotools pelo vórtex utilizado nos ensaios com MQCL.

À empresa Quimatic/Tapmatic pelo Nebulizador IV e pelo fluido de corte Quimatic Jet utilizado nos experimentos com MQCL e RQL.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, em especial ao técnico Anderson Kramer Pelufa, pelas análises de composição química e micrografias do material ensaiado.

Ao Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, pelas medições de rugosidade superficial.

À empresa Koch Metalúrgica pela paciência e disponibilidade aos momentos de ausência necessários para a realização do trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

INVESTIGAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS ALTERNATIVOS
DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO FRONTAL DE
ACABAMENTO DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Gonzaga, Douglas Ferreira
dgonzaga11@hotmail.com

Resumo. Um dos processos de fabricação mais versáteis é o fresamento, amplamente utilizado na indústria metal-mecânica. Aços inoxidáveis são caracterizados pela alta resistência mecânica e excelente desempenho em ambientes corrosivos. Possuem difícil usinabilidade devido à alta tendência ao encruamento, elevadas forças de corte e alto desgaste da ferramenta. Assim, a utilização de fluido de corte faz-se necessária, a fim de garantir a vida da ferramenta e o bom acabamento superficial. O objetivo deste trabalho é investigar a influência dos métodos de refrigeração e parâmetros de entrada sobre força e rugosidade no fresamento do aço inoxidável AISI 304 com o auxílio do projeto de experimentos Box-Behnken Design. Três métodos lubrirrefrigerantes foram avaliados: Mínima Quantidade de Fluido Refrigerado (MQCL), Reduzida Quantidade de Lubrirrefrigerante (RQL), e usinagem a seco. Os resultados mostram que os esforços não foram influenciados pelos sistemas de lubrirrefrigeração, e a profundidade axial de corte apresentou maior influência. No entanto, para a qualidade da superfície usinada, a interação entre profundidade e velocidade foi o fator de maior impacto, onde o aumento da velocidade com a menor profundidade aumenta a rugosidade. Além disso, o sistema de usinagem a seco se mostrou mais eficiente na melhoria da superfície que os demais métodos lubrirrefrigerantes.

Palavras-chave: Fresamento Frontal, Aço AISI 304, Métodos Lubrirrefrigerantes, Rugosidade Superficial, Forças de corte

Abstract. Milling is one of the most flexible manufacturing processes and, for this reason is widely used in the mechanical industry. Stainless steels are characterized by high mechanical strength and excellent performance in corrosive environments. These materials have low machinability due to the high tendency for work hardening, resulting in high cutting forces and high tool wear. Thus, the use of cutting fluid is necessary to ensure tool life and good surface finish of the machined parts. The goal of this work is to investigate the influence of the machining parameters and lubricooling methods over the machining force components and the surface roughness in the milling of AISI 304 stainless steel using the Box-Behnken Design of Experiment. Three different lubricooling methods were evaluated: Minimum Quantity Cooling Lubricant (MQCL), Reduced Quantity Lubricant (RQL), and dry machining. The results indicate no significant influence of the lubricooling method over the force components, with the axial depth of cut showing the most significant influence among the machining parameters. However, when the surface roughness of the machined surface is considered, the interaction between axial depth of cut and cutting speed presented the greatest impact, with the increase of cutting speed at the lowest depth of cut resulting on higher surface roughness values. In addition, dry machining proved to be more efficient in improving the surface quality than the other lubricooling techniques evaluated.

Keywords: End Milling, AISI 304 Steel, Lubricooling Methods, Surface Roughness, Cutting Forces

1. INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis são aços de alta liga cuja principal característica é a resistência à corrosão em ambientes adversos. A reação do cromo, seu principal elemento de liga, com o oxigênio, forma uma fina película de óxido de cromo (Cr_2O_3) sobre o material, conferindo a ele características de resistência à corrosão em ambientes com atmosfera agressiva e/ou com altas temperaturas. Existem outros elementos de liga que contribuem para o aumento da resistência à corrosão deste material, como o níquel, o cobre, o alumínio, o silício e o molibdênio. Para os aços austeníticos, o teor de níquel pode chegar a 8% [Diniz *et al.*, 2013].

A classe dos aços inoxidáveis é conhecida por sua difícil usinabilidade, o que se traduz na usinagem com uma baixa vida da ferramenta, uma limitada taxa de remoção de material, elevadas forças de corte, alto consumo de potência (devido à alta resistência mecânica em temperaturas elevadas), alto grau de encruamento, grande zona plástica durante a usinagem e reatividade com a maioria dos materiais para ferramenta quando usinado em altas velocidades de corte [Diniz *et al.*, 2013]. Entre esses materiais, aços inoxidáveis austeníticos são especialmente difíceis de usinar devido a seu elevado coeficiente de encruamento.

Nos dias atuais, existe uma demanda crescente para redução de custos na indústria metal-mecânica, a qual deve estar aliada à alta produtividade e à boa qualidade do produto. Alta produtividade está fortemente associada a elevadas taxas de remoção de material, responsáveis por aumentar significativamente o calor gerado na região de corte. Dessa forma, aspectos como a precisão dimensional, a vida da ferramenta e a integridade da superfície usinada da peça são prejudicados pelo aumento da temperatura do processo, fazendo-se importante a escolha dos melhores parâmetros de corte [Souza *et al.*, 2016].

Em processos de fabricação por usinagem, a correta seleção e aplicação de fluidos de corte trazem benefícios na produtividade, ao cumprir suas principais funções (refrigeração e lubrificação) assim como a movimentação dos cavacos. Segundo Machado *et al.*, 2015, a correta seleção de fluidos deve considerar a composição química e as propriedades do fluido, a fim de lidar da melhor forma com as adversidades do processo de corte. Quanto à aplicação, deve-se selecionar um método que possibilite uma maior aproximação do fluido de corte com a interface cavaco/ferramenta. Ainda que possuam inúmeros benefícios, os fluidos de corte ainda criam relevantes problemas para o meio ambiente e à saúde humana. A usinagem a seco é a ideal sob ponto de vista ambiental, já que elimina o uso do fluido. Em casos em que este método de corte não é possível, métodos alternativos, como a reduzida quantidade de fluido (RQL) e a técnica híbrida deste método com o ar refrigerado (MQCL) podem ser introduzidas, visando reduzir os custos e consumo de fluidos nos processos de fabricação [Souza *et al.*, 2016; Telles, 2018]

No estudo de Freitas *et al.*, 2017, não foram observadas influências consideráveis nos esforços de corte durante o processo de torneamento de aço inoxidável 304L quanto aos sistemas de refrigeração. Entretanto, para o acabamento superficial, o sistema por ar gelado (MQCL) mostrou-se mais eficiente, quando comparado ao MQL e ao fluido convencional. Neste estudo foram utilizadas altas velocidades de corte, de 215 e 290 mm/min, e raios de ponta de 0,4, 0,8 e 1,2 mm.

Xu *et al.*, 2016, observaram que o método de mínima quantidade de lubrificação eletrostática, que é uma nova tecnologia de usinagem quase seca que utiliza os efeitos sinérgicos entre a pulverização eletrostática e o MQL, melhora consideravelmente o desempenho da usinagem, sobre a vida da ferramenta, a força de corte e a rugosidade média da superfície de um AISI 304 fresado. Neste estudo, o avanço por dente é mantido constante, com o valor de 0,12 mm/dente; as velocidades de corte variam de 80 a 150 m/min. Foi observado que com o aumento da velocidade de corte, a vida útil da ferramenta reduziu, para todos os níveis de lubrificação.

Os autores Singh *et al.*, 2017 apresentaram os efeitos da mínima quantidade de lubrificante MQL revestidas sobre o desgaste da ferramenta, em um AISI 304 utilizando insertos de metal-duro. O estudo concluiu menor desgaste da ferramenta sob a condição MQL, em comparação com os métodos a seco e em abundância. Foram utilizadas velocidades de corte de 100, 120 e 140 mm/min, e profundidades de corte de 0,25, 0,5 e 0,75 mm. A combinação que gerou o mínimo desgaste foi a velocidade de corte de 140 m/min com a profundidade de corte de 0,25 mm.

Assim, este trabalho pretende contribuir com as pesquisas da área, através da análise da influência dos parâmetros de entrada (profundidade de corte, velocidade de corte e condição de lubrificação) sobre a força de usinagem e a rugosidade superficial em um processo de fresamento frontal do aço inoxidável AISI 304 com a utilização do projeto de experimentos *Box-Behnken Design*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Parâmetros de Corte no Processo de Fresamento

Em um processo de fresamento, existem as variáveis (ou parâmetros) nas quais se pode intervir, chamadas de variáveis independentes de entrada, e aquelas nas quais não se pode, chamadas de variáveis dependentes de saída, denominadas desta maneira pois são influenciadas pelas variáveis de entrada [MACHINING, 1989; Kalpakjian e Schmid, 2010].

Basicamente, são variáveis de entrada as características da ferramenta, da peça e do material, as condições de lubrificação, os parâmetros de corte (avanço, velocidade de corte, profundidade de corte) e os parâmetros dinâmicos de massa, rigidez e amortecimento do sistema máquina-ferramenta-peça. Como variáveis de saída têm-se as condições geradas na peça usinada (dimensões, acabamento, integridade), as falhas na ferramenta (desgastes e avarias), o calor gerado, a força e a potência de usinagem, a vibração gerada durante processo de corte, entre outras.[Sória, 2016].

2.2 Forças no Fresamento

O conhecimento das forças que atuam sobre a cunha cortante, e a análise de seus comportamentos, é de fundamental importância, pois delas derivam a potência requerida para executar o corte (utilizada para o dimensionamento do motor da máquina ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta [Diniz et al, 2013; Santos e Sales, 2007; Machado *et al.*, 2015]. Além disso, a força de corte pode representar um indicador da usinabilidade do material, constituindo-se como um importante parâmetro para controle adaptativo em determinado processo [Santos e Sales, 2007; Amorim, 2002].

Segundo Amorim, 2002, a força resultante (em três direções) da ação da peça sobre a ferramenta é chamada de força de usinagem (F_U), da qual nem a direção, nem o sentido são conhecidos, tornando difícil a realização da sua medição direta. Desse modo, para determinar este parâmetro, trabalha-se com as suas componentes obtidas a partir da direção do sistema de eixos de referência.

A partir da projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, têm-se a força ativa (F_a), que se posiciona no plano de trabalho. Essa força está relacionada aos movimentos de corte e avanço e, portanto contribui para o cálculo da potência de usinagem. Neste estudo, esta força é denominada de F_a . A Figura 2.1 apresenta esquematicamente o comportamento das componentes da força de usinagem durante o fresamento.

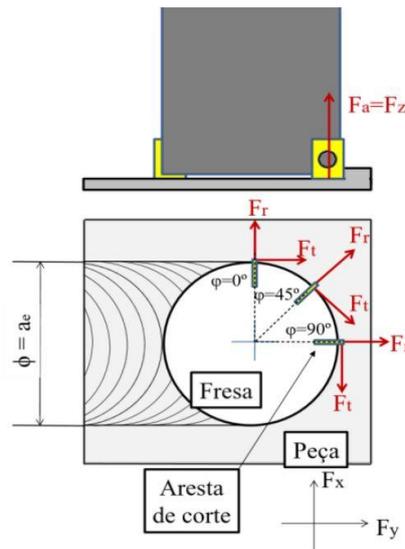


Figura 2.1 – Representação das componentes da força atuantes no processo de fresamento [Sória, 2016].

Conforme Sória, 2016, para o fresamento frontal a força pode ser decomposta em três componentes: radial (F_r), tangencial (F_t) e axial (F_{ax}) dadas pelas Equações 2.1, 2.2 e 2.3, em N. Essas forças dependem da espessura do cavaco e também estão relacionadas com a geometria da ferramenta, com o material da peça e com o material da ferramenta.

$$F_r[\text{N}] = K_r \cdot a_p \cdot \sin \varphi \quad (2.1)$$

$$F_t[\text{N}] = K_t \cdot a_p \cdot \sin \varphi \quad (2.2)$$

$$F_{ax}[\text{N}] = K_a \cdot a_p \cdot \sin \varphi \quad (2.3)$$

Onde “ K_r ”, “ K_t ” e “ K_a ” indicam as pressões específicas de corte nas respectivas direções, “ a_p ” a profundidade de corte e “ φ ” a posição angular da fresa.

Para efeito experimental, a força resultante F_U , dada em N, pode ser calculada em função das três direções ortogonais dos eixos do dinamômetro fixo na mesa da máquina, x, y e z, conforme expressa a Equação 2.4. A força ativa, por sua vez, é calculada pela contribuição dos eixos x e y, conforme Equação 2.5

$$F_U = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (2.4)$$

$$F_a = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} \quad (2.5)$$

Onde F_x , F_y e F_z são as componentes da força medida respectivamente nas direções x, y e z do experimento. No entanto, devido à variação contínua na direção de corte, é mais prático tratar das componentes ativa, que ocorre no plano de corte, e passiva, perpendicular a ele.

2.3 Rugosidade da Superfície Usinada

Por mais lisa que possa aparentar estar, a superfície usinada apresenta irregularidades intrínsecas ao processo de usinagem. São inúmeros os fatores característicos deste processo que têm influência sobre o acabamento da superfície gerada, a saber: deformações plásticas, geração de calor, vibração, tensões residuais e reatividade química [Machado et.al. 2015; Sória, 2016].

Segundo Santos e Sales, 2007 e Machado *et al.*, 2015, a qualidade de uma superfície pode ser caracterizada, em geral, em três níveis: erros de forma geométrica (falhas), ondulação e rugosidade. De um modo geral, erros de forma e ondulação devem ser evitados na fabricação de uma superfície usinada, por representarem erros de fabricação.

A rugosidade, por sua vez, caracterizada por apresentar irregularidades microgeométricas, é um parâmetro especificado em projeto, de acordo com a aplicação do componente em fabricação, uma vez que está relacionada a fatores importantes, tais como a precisão, tolerância dimensional, resistência à corrosão, lubrificação, resistência à fadiga, transmissão de calor, entre outros [Amorim, 2002].

Para a realização da medição de rugosidade, é fundamental definir o *cut-off* ou comprimento de amostragem (l_e). Este corresponde a cada trecho utilizado no cálculo dos parâmetros, com o objetivo de assegurar a significância estatística sem incluir detalhes desnecessários. A norma NBR ISO 4288, 1988, recomenda que o comprimento de avaliação seja cinco vezes o comprimento de amostragem ($l_m=5 l_e$) para determinada faixa de rugosidade.

O parâmetro mais utilizado em processos de fabricação com sulcos bem orientados, caso do fresamento, é o R_a (Rugosidade média). Com grande aplicabilidade em controle contínuo de produção, este parâmetro é medido por praticamente todos os rugosímetros, no entanto, não faz distinção entre picos e vales, oculta tais efeitos, de modo que não é adequado para, por exemplo, peças produzidas por metalurgia do pó. O parâmetro R_z , também bastante difundido, corresponde ao valor médio de cinco valores parciais de rugosidade, com boa aplicação em superfícies periódicas e conhecidas, entretanto, nem todos os rugosímetros são capazes de medir.

2.4 Métodos de Lubrirrefrigeração

De acordo com Lisboa *et al.*, 2013, de modo geral, o fluido de corte deve ser aplicado próximo à aresta de corte, nas interfaces peça/ferramenta/cavaco, a fim de que cumpra sua função. Não há um consenso entre os autores com relação à melhor direção de aplicação do fluido. Desse modo, ao se definir a forma de aplicação deve ser considerado, além do tipo do fluido de corte empregado e as direções do jato, o tipo de operação de usinagem, a pressão e o volume desse fluido.

No fresamento, a ação lubrificante é prioritária e o acesso do fluido à interface ferramenta/peça é facilitado pela intermitência da operação; assim, óleos e emulsões concentrados são indicados; no entanto, corre-se o risco de acentuar o gradiente térmico e promover trincas de origem térmica na ferramenta de corte [Machado *et al.*, 2015]. Felizmente, o aparecimento de trincas de origem pode ser reduzido através da seleção de fluidos de corte ou métodos lubrirrefrigerantes que favoreçam a lubrificação em detrimento da remoção de calor.

O método lubrirrefrigerante mais amplamente utilizado é o fluido de corte em condição abundante, que utiliza grandes quantidades de fluido na região de corte para remoção do calor do processo de usinagem. Contudo, vale a pena ressaltar que estes fluidos são ambientalmente prejudiciais e levam a altos custos de manutenção, descarte e reciclagem.

As preocupações acerca dos impactos negativos e das regulamentações com respeito à contaminação e poluição ambientais cada vez mais rigorosas têm levado as empresas a buscar novas soluções para reduzir ou eliminar o uso de fluidos de corte convencionais em favor de estratégias de lubrirrefrigeração mais eficientes e menos poluentes [Park *et al.*, 2014; Sartori *et al.*, 2018]. Dentro deste cenário, a técnica de Mínima Quantidade de lubrificante Refrigerado (MQCL), técnica híbrida que combina MQL com ar refrigerado para promover ação lubrificante e refrigerante na zona de corte, pode ser empregada.

Essa combinação de métodos tende a melhorar o desempenho em relação aos sistemas em separado, principalmente quanto à remoção de calor do processo e problemas associados a isso. Entretanto, o investimento inicial é alto [Telles, 2018].

A técnica de quantidade reduzida de fluido (RQL) faz uso da aplicação por pulverização do lubrificante a baixas vazões (0,01 a 10 l/h) sob pressões que variam de 2 a 10 bar, podendo ainda ser denominada de MQL (mínima quantidade de fluido), para vazões de 0,05 a 0,5 l/h, ou NDM (near dry machining, ou usinagem quase a seco, para vazões menores do que 0,05 l/h). Nesta técnica, a pulverização da mistura de fluido com gás (normalmente o ar comprimido) pode ocorrer nas interfaces entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça, de modo que as baixas vazões facilitam a entrada de fluido, reduzindo assim o atrito e a formação de aresta postíça de corte (APC) [Souza *et al.*, 2016]. No corte a seco há a minimização da poluição ambiental, do risco à saúde ao operador e do choque térmico; porém, esta técnica pode resultar em altas temperaturas, com consequente aceleração do desgaste da ferramenta de corte. O corte a seco é a técnica que pode gerar maiores valores de força e degradação da integridade da superfície da peça [Souza *et al.*, 2016; Telles, 2018]; no entanto, o aquecimento excessivo pode reduzir a resistência ao cisalhamento em determinados casos, reduzindo os esforços durante a usinagem.

2.5 Projeto de Experimentos *Box Behnken Design* (BBD)

Os projetos de experimentos estão baseados em conceitos estatísticos, e são destinados a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. Seu uso possibilita a estruturação da sequência de ensaios, facilitando o entendimento dos objetivos preestabelecidos pela produção do máximo de informação com um gasto mínimo de tempo e recursos [Hackenhaar, 2016].

Segundo Montgomery, 2013, o projeto de experimentos *Box-Behnken*, proposto por Box e Behnken em 1960, consiste em um projeto com três níveis fatoriais incompletos (baixo: -1, médio: 0, alto: +1), combinando um projeto fatorial 2^k com blocagem incompleta, rotacional ou quase-rotacional, que assegura a mesma precisão nas estimativas de Y (resposta) para todos os pontos do espaço. O projeto de experimento *Box-Behnken* possui design esférico, com todos os pontos pertencendo a uma esfera de raio $\sqrt{2}$, ou seja, interna ao cubo com sua superfície limitada pelos pontos médios das arestas do cubo.

Este tipo de projeto de experimentos não realiza nenhum ensaio considerando a combinação simultânea dos três fatores em níveis máximos ou mínimos.

Considerando um experimento com três fatores e três níveis são necessários 15 amostras ou passes, sendo 12 relacionadas às combinações de valores máximos ou mínimos de dois fatores e três correspondentes ao ponto central, onde são combinados os níveis médios para os três fatores. Os passes do ponto central são realizados três vezes para verificar a repetitividade do experimento, fornecendo assim uma medida de dispersão [Baumgaertner, 2017].

A Figura 2.2 representa geometricamente os três fatores do projeto de experimentos (X1, X2, X3) e seus três níveis (-1, 0, 1), onde os círculos escuros representam as combinações de parâmetros de cada ensaio e o círculo vazado o ponto central. A ausência de círculos pretos nos vértices do cubo se deve à não utilização simultânea dos níveis máximos.

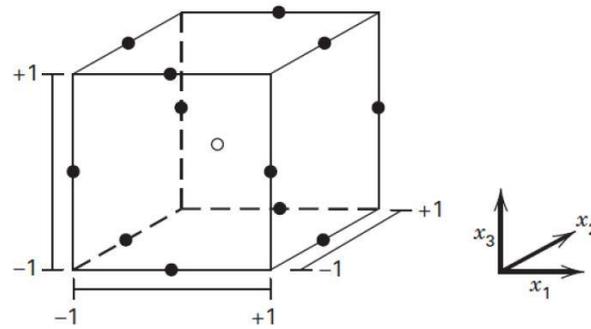


Figura 2.2 - Representação Gráfica de um projeto Box-Behnken de três fatores [Montgomery, 2013].

3. METODOLOGIA APLICADA

Para realização dos experimentos, foram utilizados dois corpos de prova de aço inoxidável austenítico AISI 304, os quais foram previamente dimensionados a fim de facilitar a fixação no dinamômetro piezelétrico, conforme ilustra a Figura 3.1. Como forma de buscar o melhor aproveitamento de cada corpo de prova a ser fresado, considerando o diâmetro da fresa, foram definidos seis passes por face, totalizando o número máximo de 12 passes por corpo de prova. Assim, os passes numerados de 1 a 12 foram realizados na amostra denominada de Corpo de Prova 1, e os três passes restantes no Corpo de Prova 2.

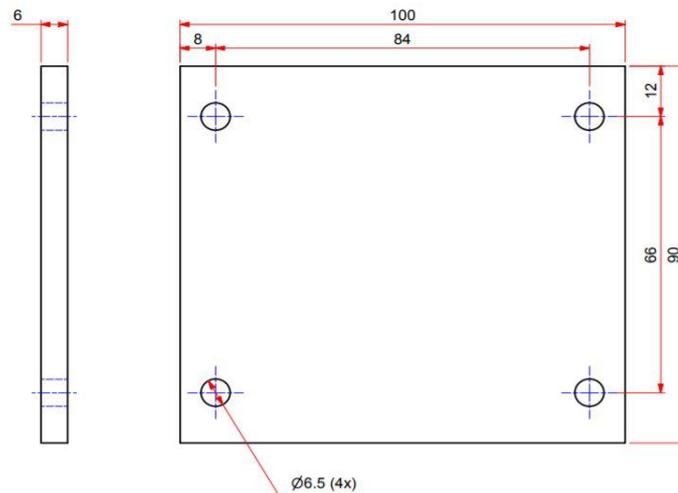


Figura 3.1- Detalhamento bidimensional do corpo de prova (dimensões em mm).

Fonte: Autor

Primeiramente, a composição química do material foi verificada no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS), com auxílio do espectrômetro de emissão óptica para análise de metais Spectrolab modelo LVFA18B. Os resultados encontrados nos corpos de prova (CP 1 e CP 2) estão apresentados na Tabela 3.1, assim como a composição padronizada do AISI 304 [ASM, 1989].

Tabela 3.1. Composição química dos principais elementos de liga do AISI 304 (% em massa)

Elemento	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C	P	S
CP 1	71,5	17,97	8,29	0,156	1,16	0,415	0,174	0,044	0,033	0,003
CP 2	71,5	17,93	8,26	0,157	1,16	0,422	0,175	0,057	0,036	0,003
Padronizado	--	18-20	8-10,5	--	2,00 (máx.)	1,00 (máx.)	--	0,08 (máx.)	0,04 (máx.)	0,03 (máx.)

Foi realizada uma análise metalográfica em amostras retiradas dos corpos de prova, submetidas a ataques químicos do reagente Kalling's N. 2 (Fig. 3.2) em imersão durante aproximadamente seis minutos. Com o objetivo de revelar a microestrutura austenítica, as amostras foram observadas no Microscópio Leica modelo DM2700 M. Notam-se nas imagens os contornos de grão austeníticos, bem como regiões mais escuras de segregação (distribuição heterogênea de elementos de liga e impurezas na estrutura).

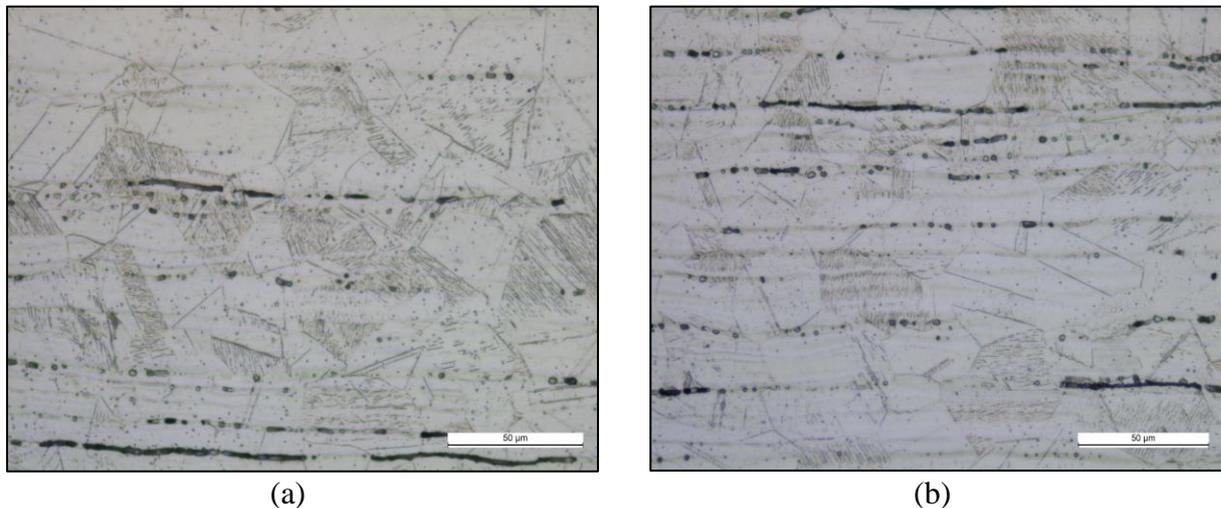


Figura 3.2 Microestrutura do AISI 304: (a) Amostra do CP 1, ampliação de 500x (b) Amostra do CP 2, ampliação de 500x.

Os ensaios de fresamento foram realizados no centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 308, localizado no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). A máquina-ferramenta possui rotação máxima de 4000 rpm, potência máxima de 5,5 kW (7,5 cv) e curso máximo dos eixos x, y e z de, respectivamente, 450 mm, 310 mm e 410 mm.

Utilizou-se como ferramenta de corte uma fresa de topo reto Walter Tools Xtra-tec F4042R. W20.02 com diâmetro nominal $d = 20$ mm e dois insertos Tiger-tec Silver ADMT10T316R-F56 WSM35 com raio de ponta $r_e = 1,6$ mm. Esses insertos são ferramentas de classe M, para aços inoxidáveis, e possuem cobertura PVD (deposição física a vapor) de $TiAlN + Al_2O_3$ (nitreto de titânio-alumínio e óxido de alumínio).

Nos ensaios com MQCL, empregou-se um tubo de vórtice Eurotools modelo Turbo Air FTA-12-MC, acoplado ao Nebulizador IV, produzido pela Tapmatic do Brasil, com o bico injetor (pulverizador) fixado a aproximadamente 20 mm da aresta de corte da ferramenta. A temperatura do ar refrigerado foi medida com o auxílio de um termômetro de mercúrio, após sua estabilização, sendo igual a 10 °C. O fluido de corte selecionado foi o fluido sintético Quimatic Jet à base d'água, indicado para altas velocidades de corte por possuir alto poder refrigerante, e a vazão utilizada foi de 160 ml/h.

Para o método de RQL, houve a retirada do tubo de vórtice para a medição da vazão empregada, resultando em 400 ml/h. Com o termômetro, também foi medida a temperatura para esta condição, de 19°C. A pressão de ar comprimido para ambas as condições lubrificantes foi de 4 bar. A Figura 3.3 ilustra a montagem dos ensaios realizados nas condições apresentadas. Os cortes a seco foram realizados à temperatura ambiente (25°C).

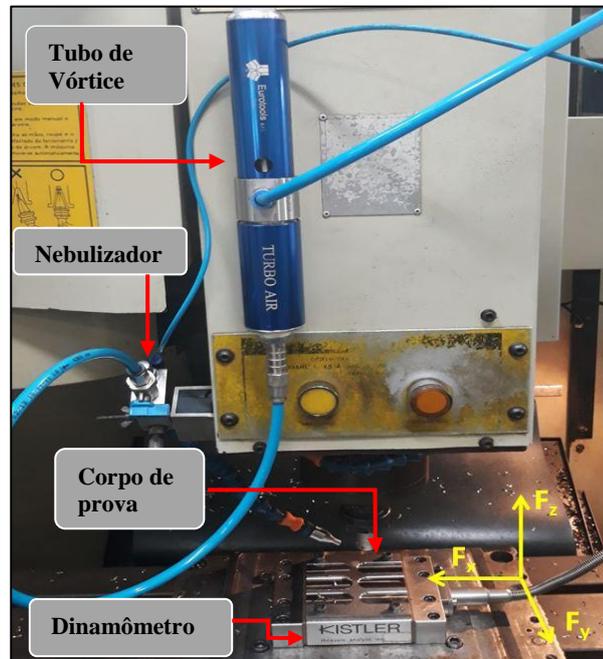


Figura 3.3 – Montagem dos experimentos para fresamento com diferentes sistemas de lubrificação.

A aquisição dos sinais de força foi realizada através do dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler modelo 9129AA, que possui faixa de medição de -10 kN a 10 kN, sensibilidades de -8,0 pC/N nos eixos x e z, e de -4,1 pC/N (eixo y), e frequências naturais de 3,5 kHz (eixos x e z) e 4,5 kHz (eixo y). O condicionamento desses sinais foi realizado pelo amplificador de carga Kistler modelo 5070A e o processamento dos dados nas três direções ortogonais (x, y e z) pelo software LabView™ 9.0, instalado em um computador dedicado com a placa de aquisição PCIM-DAS 1602/16 da Measurement Computing (Fig. 3.4). A taxa de aquisição de dados foi de 2500 pontos por segundo para cada passe, valor considerado adequado para a análise apenas da parcela estática da força de corte. Esta força representará o valor médio da força de usinagem dentro do intervalo estável, o qual refere-se ao intervalo sem a influência da entrada e da saída da fresa na amostra, a fim de evitar efeitos não inerentes apenas à usinagem. Os valores médios das forças de usinagem foram determinados e analisados pelo software MS Excel.

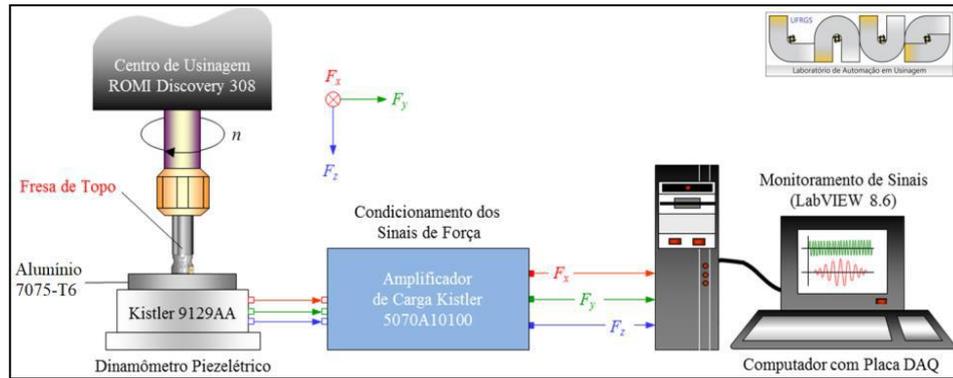


Figura 3.4 - Esquema do sistema de aquisição de sinais de força em ensaios de fresamento. [Adaptado de Sória, 2016]

Após a realização dos passes, foi realizada, no Laboratório de Tribologia (LATRIB), a medição das rugosidades utilizando-se o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SurfTest SJ-201P, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e agulha com raio de ponta de $5 \mu\text{m}$. Segundo padrões indicados pela norma NBR ISO 4288, 1998, para valores de rugosidade média (R_a) de $0,1$ a $0,2 \mu\text{m}$, o comprimento de amostragem (*cut-off*) escolhido foi de $L_e = 0,8 \text{ mm}$ e o comprimento de medição de $l_m = 5 \cdot l_c = 4,0 \text{ mm}$. Os valores foram medidos em três regiões do passe, no centro e nas duas extremidades, nas quais o comprimento de medição foi considerado respeitando uma distância de 10 mm (raio da fresa) do início do passe e 20 mm (diâmetro da fresa) do final do passe, de modo a alcançar a região onde o corte ocorreu “em cheio”. Uma média aritmética das três regiões foi realizada, a fim de obter o valor equivalente para cada passe.

Para a execução dos experimentos, foi aplicado o projeto de experimentos *Box-Behnken* (BBD) de três fatores, com cada parâmetro de entrada variando em três níveis. Os parâmetros foram: velocidade de corte v_c [mm/min], a profundidade axial de corte a_p [mm] e o meio lubrificante. Os valores de velocidade de corte foram considerados acima do recomendado pelo fabricante ($v_c \geq 100 \text{ mm/min}$). O avanço por dente (f_z) foi mantido constante, com o valor de $f_z = 0,1 \text{ mm/dente}$. Como foram utilizados dois inserts, o avanço por volta foi de $f = 0,2 \text{ mm/volta}$.

Dos elementos geométricos da ferramenta de corte, o que apresenta maior influência sobre a rugosidade é o raio de ponta, que deve ser suficientemente grande (pelo menos o dobro do avanço) para diminuir o efeito das marcas de avanço, com apreciável melhora na rugosidade. Entretanto, um raio de ponta excessivamente alto pode induzir vibrações [Machado et al., 2015]. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de entrada e os níveis de variação.

Tabela 3.2 – Parâmetros e seus níveis selecionados para o Projeto de Experimentos.

Parâmetros	Nível Inferior (-1)	Nível Central (0)	Nível Superior (1)
Profundidade Axial de Corte (a_p) [mm]	0,4	0,8	1,2
Velocidade de Corte (v_c) [m/min]	120	160	200
Meio Lubrificante	SECO	RQL	MQCL

Com o auxílio do software Minitab 19 foi gerada a matriz de experimento, respeitando a aleatoriedade e a combinação dos fatores conforme a metodologia *Box-Behnken*. No total, foram realizados 15 passes, conforme apresenta a Tabela 4.1. Os passes indicados com um (*) correspondem ao ponto central dos níveis dos parâmetros de entrada.

As variáveis dependentes de saída escolhidas para este estudo foram a força de usinagem gerada no processo de fresamento e a rugosidade da superfície usinada.

Com o intuito de entender a influência dos fatores (v_c , a_p e meio) sobre cada variável de saída, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) dos valores medidos, com um nível de confiança de 95%, através do software Minitab 19. Sob tal intervalo, considera-se como estatisticamente relevante o fator com p-valor menor ou igual a 0,05. O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação na resposta que é explorada pelo modelo.

4. RESULTADOS

A seguir serão apresentados e devidamente comentados, os resultados da força de usinagem (força resultante F_U) e da força ativa F_a , calculadas a partir da média RMS, escolhidas devido ao caráter cíclico dos esforços durante o fresamento e os resultados dos valores médios das rugosidades superficiais R_a e R_z .

A Tabela 4.1 apresenta os resultados para força e rugosidade obtidos a partir dos 15 passes realizados, utilizando três níveis de profundidade de corte (a_p), três de velocidade de corte (v_c) e três diferentes meios lubrificantes.

Tabela 4.1 - Resultados de força resultante de usinagem (F_U), da força ativa (F_a) e das rugosidades (R_a) e (R_z).

Passe	a_p [mm]	v_c [mm/min]	Meio Lubrificante	F_U [N]	F_a [N]	R_a [μ m]	R_z [μ m]
1	0,4	120	RQL	138,7 \pm 78,4	107,4 \pm 36,1	0,42 \pm 0,07	2,72 \pm 0,43
2	1,2	120	RQL	330,8 \pm 183,1	304,4 \pm 93,7	0,70 \pm 0,23	4,13 \pm 0,92
3*	0,8	160	RQL	225,9 \pm 128,1	196,0 \pm 63,4	0,61 \pm 0,04	3,31 \pm 0,47
4	1,2	200	RQL	313,0 \pm 175,7	289,1 \pm 89,86	0,54 \pm 0,04	2,87 \pm 0,31
5	0,4	160	SECO	151,1 \pm 79,0	117,1 \pm 38,9	0,61 \pm 0,17	3,19 \pm 0,84
6*	0,8	160	RQL	238,6 \pm 131,3	206,4 \pm 66,3	0,45 \pm 0,07	2,71 \pm 0,54
7	0,4	160	MQCL	129,4 \pm 71,5	100,5 \pm 33,0	0,49 \pm 0,02	3,00 \pm 0,11
8	1,2	160	MQCL	310,9 \pm 175,9	285,9 \pm 89,4	0,47 \pm 0,02	2,95 \pm 0,46
9	0,8	120	SECO	234,5 \pm 134,0	204,5 \pm 65,52	0,27 \pm 0,02	2,10 \pm 0,07
10	0,8	200	SECO	227,7 \pm 127,3	199,8 \pm 63,6	0,35 \pm 0,08	2,32 \pm 0,33
11	0,8	120	MQCL	253,9 \pm 133,9	220,2 \pm 67,8	0,35 \pm 0,03	2,17 \pm 0,10
12	0,8	200	MQCL	232,9 \pm 128,3	203,9 \pm 64,1	0,60 \pm 0,03	3,62 \pm 0,14
13*	0,8	160	RQL	224,6 \pm 124,1	195,1 \pm 61,7	0,46 \pm 0,04	3,07 \pm 0,28
14	0,4	200	RQL	136,2 \pm 73,8	105,9 \pm 35,1	0,65 \pm 0,03	3,82 \pm 0,31
15	1,2	160	SECO	309,3 \pm 172,4	285,3 \pm 87,8	0,30 \pm 0,02	1,93 \pm 0,05

4.1 Força de Usinagem RMS

Os valores da força de usinagem (resultante) RMS e da força ativa RMS estão apresentados na Figura 4.1, de acordo com as condições avaliadas e expostas na Tabela 4.1. Com o objetivo de avaliar a contribuição de cada parâmetro sobre as variáveis de saída F_U e F_a foi realizada a análise de variância (ANOVA) do projeto de experimentos BBD, adotando um intervalo de confiança de 95%. Sob tal intervalo, considera-se como estatisticamente relevante o fator com p-valor menor ou igual a 0,05. O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação na resposta que é explorada pelo modelo.

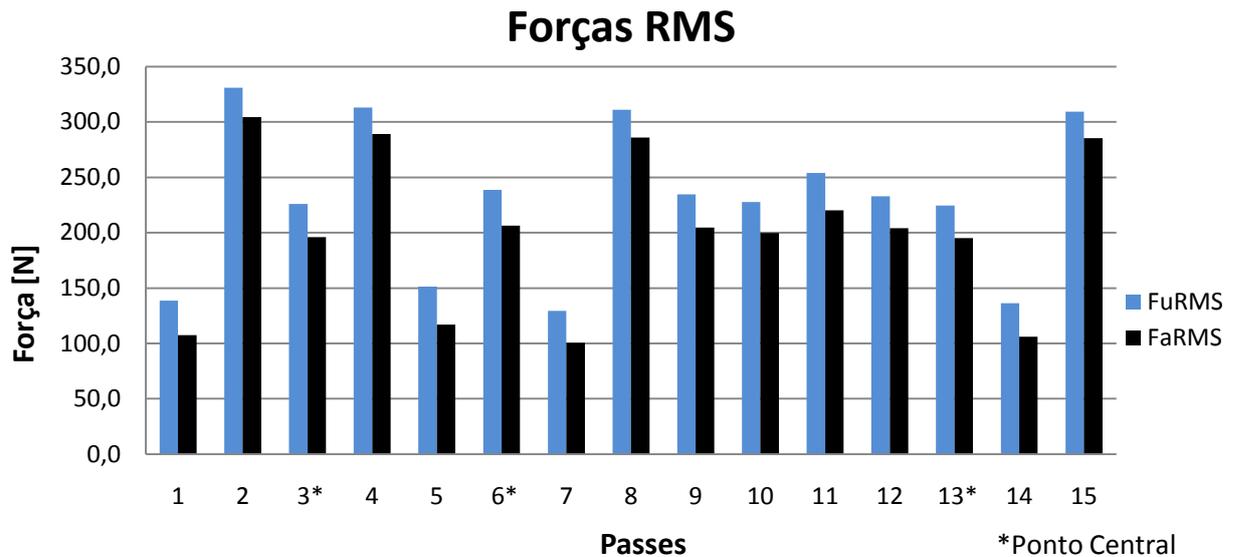


Figura 4.1 - Valores da força de usinagem F_U (RMS) para os passes.

Em análise à Figura 4.1, observa-se que tanto para F_U quanto para F_a foi obtido o mesmo comportamento, ou seja, as maiores e as menores forças estão explicitadas nos mesmos passes. Este resultado indica a estabilidade do processo: o fato da força passiva (componente F_z da força de corte) apresentar pouca variação, indica que não houve a presença de *chatter*. Ainda, de acordo com a Figura 4.1 (e Tabela 4.1), o maior valor para F_U foi observado no Passe 2 ($330,8 \pm 175,7$ N). Para esse passe, foi aplicado o nível superior de a_p (1,2 mm). O menor valor para a F_U ocorreu no passe 7 ($129,4 \pm 71,5$ N), no qual foi utilizado o nível inferior de a_p (0,4 mm). Santos e Sales, 2007, explicam que, com o incremento do avanço f_z e da profundidade de corte a_p , as forças se elevam numa proporção direta, quase linear. Isto acontece devido ao aumento das áreas de cisalhamento primário e secundário durante o corte. Neste estudo, o avanço foi mantido em um nível fixo, de modo que a_p se torna o parâmetro responsável por este efeito.

A Tabela 4.2 apresenta o resultado simplificado da análise de variância sobre as forças resultante e ativa. O resultado completo desta ANOVA encontra-se no Apêndice I.

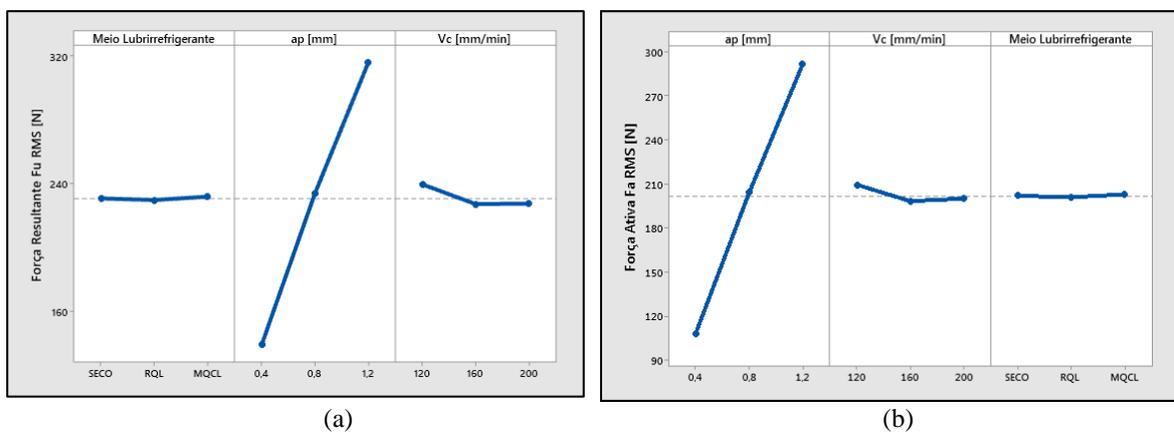
Tabela 4.2 - ANOVA para F_U e F_a gerada no fresamento do AISI 304.

Fator	F_u		F_a	
	P-valor	Proporção (%)	P-valor	Proporção (%)
a_p	0,000	98,72	0,000	99,20
v_c	0,144	0,46	0,160	0,26
Meio lub	0,879	0,00	0,876	0,00
a_p^2	0,290	0,21	0,421	0,07
v_c^2	0,293	0,21	0,198	0,21
Meio lub ²	0,776	0,01	0,705	0,02
$a_p * v_c$	0,472	0,09	0,434	0,07
$a_p * \text{meio lub}$	0,289	0,21	0,338	0,11
$v_c * \text{meio lub}$	0,502	0,08	0,506	0,05
	R² = 99,24%		R² = 99,52%	

A análise da ANOVA (Tabela 4.2), confirma que o efeito linear da profundidade axial de corte (a_p) influencia quase que exclusivamente no comportamento dos esforços de corte.

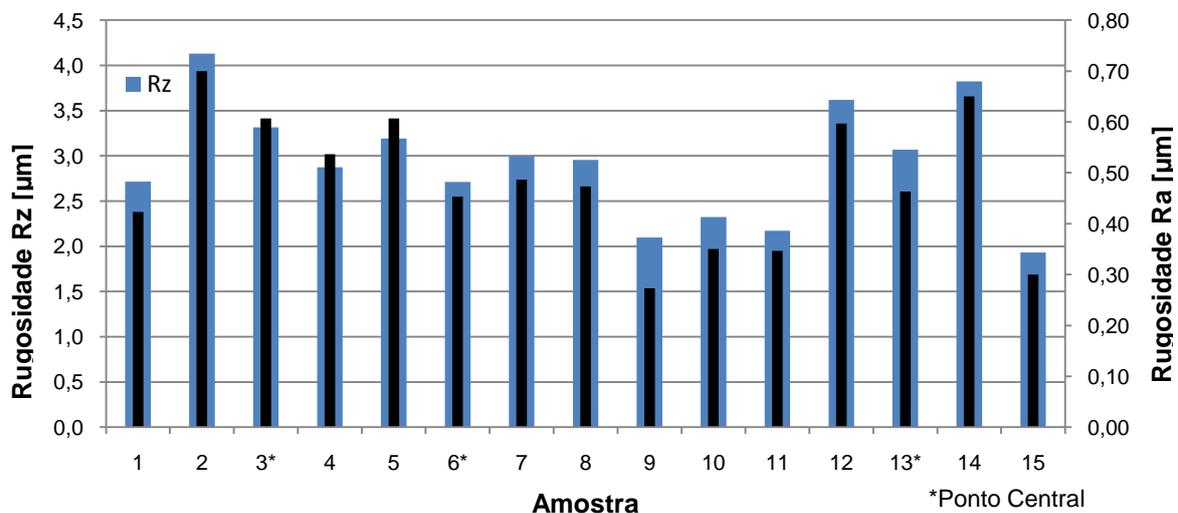
A velocidade de corte (v_c), no entanto, não apresentou nenhuma influência significativa nos resultados obtidos, ainda que a Fig. 4.2 indique um pequeno decréscimo das forças com o aumento da velocidade.

A Figura 4.2 apresenta os gráficos de efeitos principais para as forças de corte. É possível verificar que apenas a profundidade de corte teve influência nos valores médios dos esforços. Em comparação do nível inferior de a_p com seu respectivo nível superior para F_U , observa-se um aumento de 56% em função deste incremento no parâmetro, passando de 139 N para 316 N. Nota-se também que o meio lubrificador não influenciou significativamente os valores de força, no entanto, que os valores são praticamente constantes, com uma ínfima vantagem do sistema RQL perante o corte a seco e o método MQCL. Quando comparado com o sistema a seco, o RQL apresentou redução de 0,35%, e redução de 0,9% para o MQCL.



4.2 Rugosidade da Superfície Usinada

Os valores de Rugosidade R_a e R_z encontrados para as diferentes amostras estão apresentados na Figura 4.3.



De acordo com as Figura 4.3 (e Tabela 4.1), os maiores valores para R_a e para R_z foram observados no Passe 2 ($0,42 \pm 0,07$) μm e ($2,72 \pm 0,43$) μm , respectivamente). Para esse passe, foi aplicado o nível superior de a_p (1,2 mm), v_c inferior (120 mm/min) e RQL. Os menores valores para as rugosidades ocorreram nos passes 15 ($0,30 \pm 0,02$ μm e $1,93 \pm 0,05$ μm) e 9 ($0,27 \pm 0,02$ μm e $2,10 \pm 0,07$ μm), nos quais foram utilizados, respectivamente, o nível superior de a_p (1,2 mm), v_c central (160 mm/min) e SECO, e o nível central de a_p (0,8 mm), v_c inferior (120 mm/min) e SECO.

Conforme o raio de ponta (r_c) e o avanço por dente (f_z), considerados constantes no estudo, o valor teórico calculado pela Eq. 2.5 para a rugosidade média R_a deveria também se manter constante. Assim sendo, a ANOVA buscou apresentar a influência de cada parâmetro de entrada variável perante as rugosidades R_a e R_z , considerando um intervalo de confiança de 95%. A Tabela 4.3 apresenta o resultado simplificado desta análise. A ANOVA completa de cada parâmetro é apresentada nos Apêndice III e IV.

Tabela 4.3 – ANOVA simplificada para R_a e R_z gerada no fresamento do AISI 304.

Fator	Ra		Rz	
	P-valor	Proporção (%)	P-valor	Proporção (%)
a_p	0,065	7,23	0,069	5,33
v_c	0,018	15,76	0,024	10,14
Meio lub	0,133	4,19	0,038	7,79
a_p^2	0,031	11,56	0,037	7,95
v_c^2	0,355	1,35	0,241	1,77
Meio lub ²	0,010	21,41	0,006	21,39
$a_p * v_c$	0,004	31,50	0,002	36,07
$a_p * \text{meio lub}$	0,103	5,18	0,081	4,75
$v_c * \text{meio lub}$	0,292	1,81	0,079	4,83
	R² = 95,35%		R² = 94,05%	

A partir dos resultados da ANOVA, observa-se que o fator de influência mais significativo para os dois parâmetros de rugosidade avaliados, R_a e R_z , é o efeito de interação entre a profundidade de corte e a velocidade de corte ($a_p \times v_c$), com 31,50% e 36,07% respectivamente, seguido pelo efeito quadrático do meio lubrificante. Os demais fatores que apresentaram influência significativa foram a velocidade de corte e o efeito quadrático da profundidade de corte (a_p). Os valores de R^2 indicam uma boa confiabilidade nos testes realizados, apontando assim para um baixo desvio padrão das repetições.

A Figura 4.4 apresenta gráficos de contorno para as rugosidades médias em função da interação $a_p \times v_c$, considerando fixo cada um dos métodos de lubrificação estudados.

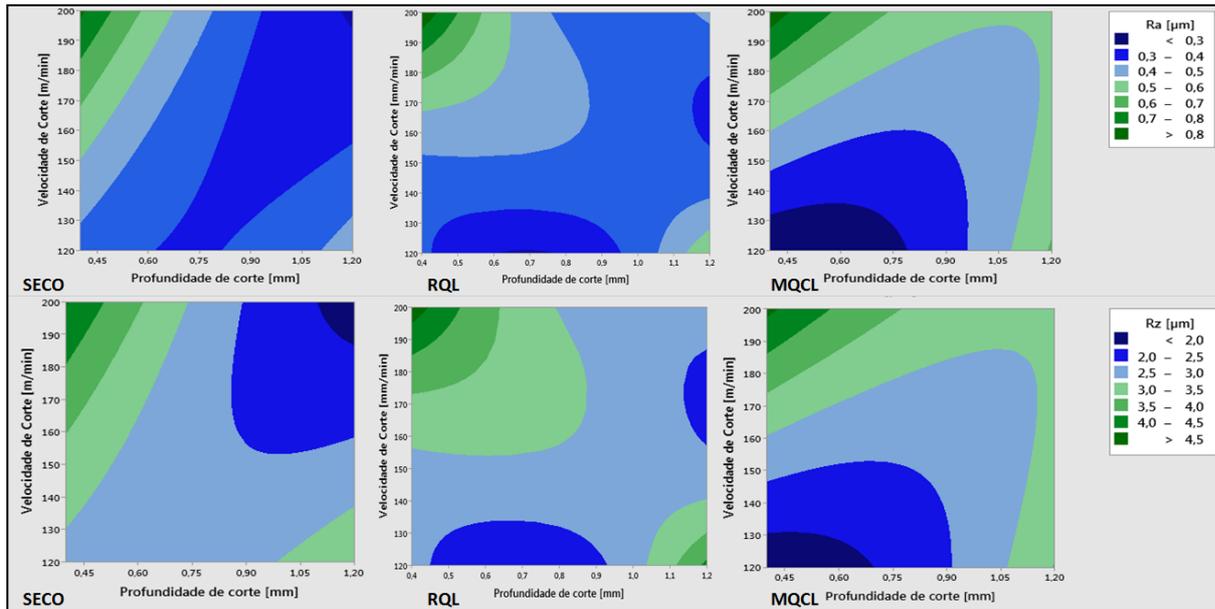
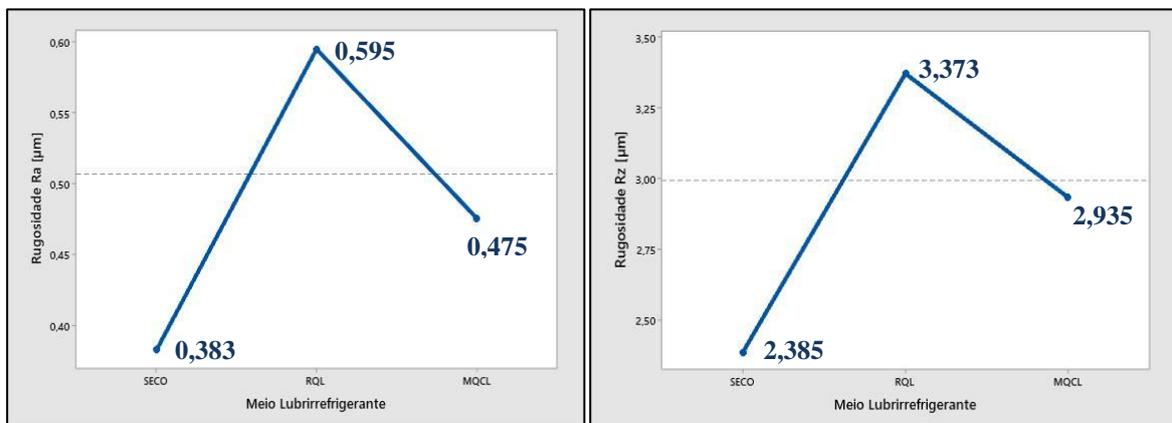


Figura 4.4 – Gráficos de contorno $a_p \times v_c$ para as rugosidades R_a e R_z gerados no fresamento do AISI 304

Analisando a Figura 4.4, verifica-se que, embora a condição a seco apresente os menores valores de rugosidade apresentados na Fig. 4.1, resultados semelhantes são encontrados para a condição MQCL; não obstante, a combinação de parâmetros varia com o método estudado. Para o método MQCL, menores rugosidades são obtidas para a combinação de baixas velocidades de corte com baixas profundidades de corte, assim, ao passo em que se aumentam estes parâmetros, piora-se o acabamento. Para a condição a seco, observa-se que com o aumento da velocidade de corte, para médias/altas a_p há a diminuição das rugosidades, tanto para R_a quanto para R_z . Segundo Santos e Sales, 2007, o aumento de v_c causa a redução da resistência ao cisalhamento do material, melhorando assim o acabamento da superfície. Já para o método RQL, verifica-se que o aumento da velocidade ocasiona um pior acabamento superficial para baixas profundidades de corte; com o aumento de a_p , no entanto, melhores acabamentos são obtidos para as velocidades médias/altas deste estudo.

De modo a esclarecer de modo quantitativo o efeito das condições lubrificantes, a Figura 4.5 ilustra os gráficos de efeitos principais dos níveis adotados no estudo em relação às rugosidades médias calculadas.



(a)

(b)

Figura 4.5 – Gráfico de efeitos principais em função das condições de lubrificação: (a) R_a ; (b) R_z .

A Figura 4.5 possibilita visualizar a influência quadrática do meio lubrificante, através de uma parábola invertida. Além disso, confirma a pequena vantagem do corte a seco quando comparado ao RQL e ao MQCL, tanto para os valores de R_a quanto para os valores de R_z , apresentando uma redução de 19,3% no valor de R_a e de 18,7% no valor de R_z . Comparando os sistemas MQCL com o RQL, nota-se uma redução de 20,2% no valor de R_a e de 13% para o valor de R_z . Sendo assim, pode-se afirmar que a utilização de MQCL gera uma economia do processo em relação ao RQL, ao passo que reduz simultaneamente a aquisição de maiores volumes de fluidos de corte e a demanda por armazenagem e descarte desses fluidos após sua utilização. Entretanto, para a combinação de baixas velocidades de corte e profundidades de corte, o método MQCL apresenta os melhores resultados. Considerando, portanto, todas as variáveis envolvidas no processo têm-se no corte a seco, a melhor opção dentre os métodos de lubrificação estudados.

5. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos pelo uso do BBD, buscou-se avaliar o comportamento das forças geradas e da rugosidade da superfície usinada a partir da variação dos parâmetros de entrada (a_p , v_c e meio lubrificante) sobre o fresamento frontal de acabamento em amostras de aço inoxidável AISI 304.

O comportamento das forças resultante e ativa se mostrou conforme o esperado. Os menores valores de profundidade de corte geraram menores níveis de força, conforme consolidado na literatura. Entretanto, para a velocidade de corte e o meio lubrificante, não foram identificadas variações notáveis nos valores médios de força.

Para as rugosidades, a análise estatística mostrou influência significativa das interações $a_p \times v_c$, seguido do efeito quadrático do método lubrificante utilizado (meio lub²), bem como o efeito linear da velocidade de corte e o efeito quadrático da profundidade de corte (a_p^2). Sob esse aspecto, os gráficos de contorno atestaram que os melhores acabamentos requerem baixa v_c e média a_p , comprovando a interação entre v_c e a_p , para R_a e R_z . O método MQCL permitiu a obtenção de melhores acabamentos dentre os métodos estudados apenas nas interações de baixas velocidades e profundidades de corte. No entanto, excetuando esta combinação, os melhores resultados foram obtidos a partir do corte a seco.

Neste trabalho observou-se, de modo geral, que os métodos de lubrificação RQL e MQCL não apresentaram forte influência sobre a força e a rugosidade do material usinado. Considerando-se o custo tanto dos equipamentos utilizados quanto do fluido de corte, e ainda que quanto menor o uso desses produtos mais sustentável e menos danoso à saúde do operador é o processo de usinagem, é possível afirmar que, do ponto de vista das variáveis analisadas neste estudo, os custos associados ao corte a seco serão mais baixos. Desse modo, quando somente esforços e acabamento superficial são considerados, tem-se que o corte a seco é vantajoso na usinagem do aço AISI 304.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METAL (ASM). Handbook, Machining of stainless steel “**machining**”, v.16, p. 681-707, 1989.
- Amorim, H. J. de “**Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**”, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, UFRGS, 2002.
- Baumgaertner Filho, A. J., 2017, “**Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**”, Dissertação (mestrado) em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, RS, 91 p.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L., “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”. 8.ed. São Paulo, Artliber, 2013.
- Freitas, Samuel *et al.* “**Análise da rugosidade e esforços no corte ortogonal do aço 304l com diferentes sistemas de lubrificação**”. In: anais do ix congresso brasileiro de engenharia de fabricação 2017, anais. In: congresso brasileiro de engenharia de fabricação.ABCM,2017.Disponível em:<<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COF2017/0994>>. Acesso em: 27 out. 2019.
- Hackenhaar, W. “**Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R., **Manufacturing Engineering and Technology**, 6.ed., Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.
- Lima, D. O., Araujo, A. C., Silveira, J. L. L. “**Influência da profundidade de corte e do avanço na força de corte no fresamento de faceamento**”, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul. - 03 Ago., São Luís, MA, 2012, 10p.
- LIN, T.R., “**Experimental Design and performance analysis of TiN – coated carbide tool in facemilling stainless steel**”. Journal of material processing technology, n.127, p.1-7, 2002.
- Lisboa, F. C., Moraes, J. J.B., Hirashita, M. A., 2013, “**Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**”, 33º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP 2013), 08-11 Outubro, 2013, Salvador, BA, 16p.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. “**Teoria da Usinagem dos Materiais**”, 3.ed., São Paulo, Blucher, 2015, 371p.
- Montgomery, D.C., “**Applied statistics and probability for engineers**”. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley& Sons, 2013.
- NBR ISO 4288 “**Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.
- Park, K., Yang, G., Lee, M., Jeong, H., Lee, S. e Lee, D. Y. Eco-Friendly Face Milling of Titanium Alloy, “**International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**”, vol. 15(6), p. 1159-1164, 2014.
- Quimatic. “**Nebulizador IV Tapmatic**”. <http://www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/nebulizador-4/>, 2019, Acesso em: 26-11-2019.
- Santos, S.C., Sales, W.F. “**Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**”, 1 ed., São Paulo, Artliber Editora, 2007, 246p.
- Sartori, S., Ghiotti, A. e Bruschi, S. “**Solid Lubricant-assisted Minimum Quantity Lubrication and Cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning**”, Tribology International, vol. 118, p. 287-294, 2018.

- Singh, S.; Singh, P.; Singh, T.; Dureja, J.S.; Dogra, M.; Singh, H. **“Minimum Quality Lubrication (MQL) Milling of Stainless Steel 304 using Coated Carbide Tool Inserts”**. IJAMR, Patiala , 2017.
- Sória, B. S., **“Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de Wavelet”**. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- Souza, A.J.; Rodrigues, S.I.; Rosa, G.C. **“Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper”**. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 21 a 25 de agosto, Fortaleza-Ceará, 2016.
- Telles, A., **“Avaliação da rugosidade no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável”**. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- Xu, X, Huang, S., Wang M., Yao, Weiqiang. **“A study on process parameters in end milling of AISI 304 stainless steel under electrostatic minimum quantity lubrication conditions”**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 12p , 2016.

NOMENCLATURA

MQCL	Minimum Quantity Colling Lubricant	
RQL	Reduced Quantity Lubricant	
AISI	American Iron and Steel Institute	
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física	
LATRIB	Laboratório de Tribologia	
BBD	Box-Behnken Design	
MS	Microsoft Software	
ISO	International Organization for Standardization	
ANOVA	Análise de Variância	
RMS	Root Mean Square	
NDM	Near Dry Machining	
APC	Aresta Postiça de Corte	
CP	Corpo de prova	
K	Pressão Específica de Corte	[N/mm ²]
a_p	Profundidade Axial de Corte	[mm]
v_c	Velocidade de Corte	[mm/min]
F_r	Força Radial	[N]
F_{ax}	Força Axial	[N]
F_t	Força Tangencial	[N]
φ	Posição Angular da Fresa	[graus]
R_a	Rugosidade Média	[μ m]
R_z	Rugosidade Média Parcial	[μ m]
l_m	Comprimento Total de Medição	[mm]
l_e	Comprimento de Amostragem	[mm]
r_ε	Raio de Ponta	[mm]
f_z	Avanço por Dente	[mm]
F_U	Força de Usinagem	[N]
F_a	Força Ativa	[N]

APÊNDICE

I – ANOVA completa para a força resultante de usinagem F_U

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	p-valor	Proporção(%)
ap	62753,6	1	62753,6	647,760	0,000	98,72
vc	289,8	1	289,8	2,990	0,144	0,46
meio	2,5	1	2,5	0,030	0,879	0,00
ap ²	135,7	1	135,7	1,400	0,290	0,21
vc ²	133,9	1	133,9	1,380	0,293	0,21
meio ²	8,7	1	8,7	0,090	0,776	0,01
ap*vc	58,5	1	58,5	0,600	0,472	0,09
ap*meio	136	1	136	1,400	0,289	0,21
vc*meio	50,6	1	50,6	0,520	0,502	0,08
Erro	484,4	5	96,9			
R² = 99,24%						

II – ANOVA completa para a força ativa F_a

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	p-valor	Proporção(%)
ap	67306	1	67306	1022,54	0,000	99,20
vc	178,9	1	178,9	2,72	0,160	0,26
meio	1,8	1	1,8	0,03	0,876	0,00
ap ²	50,5	1	50,5	0,77	0,421	0,07
vc ²	144,9	1	144,9	2,2	0,198	0,21
meio ²	10,6	1	10,6	0,16	0,705	0,02
ap*vc	47,5	1	47,5	0,72	0,434	0,07
ap*meio	74	1	74	1,12	0,338	0,11
vc*meio	33,8	1	33,8	0,51	0,506	0,05
Erro	329,1	5	39,2			
R² = 99,52%						

III – ANOVA completa para a rugosidade R_a

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	p-valor	Proporção(%)
ap	0,03	1,00	0,03	5,55	0,07	7,23
vc	0,07	1,00	0,07	12,10	0,02	15,76
meio	0,02	1,00	0,02	3,22	0,13	4,19
ap ²	0,05	1,00	0,05	8,88	0,03	11,56
vc ²	0,01	1,00	0,01	1,04	0,36	1,35
meio ²	0,09	1,00	0,09	16,44	0,01	21,41
ap*vc	0,13	1,00	0,13	24,19	0,00	31,50
ap*meio	0,02	1,00	0,02	3,98	0,10	5,18
vc*meio	0,01	1,00	0,01	1,39	0,29	1,81
Erro	0,027	5	0,005			
R² = 95,35%						

IV – ANOVA completa para a rugosidade R_z

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor F	p-valor	Proporção(%)
ap	0,41	1,00	0,41	5,33	0,07	5,33
vc	0,79	1,00	0,79	10,14	0,02	10,14
meio	0,60	1,00	0,60	7,79	0,04	7,79
ap²	0,62	1,00	0,62	7,95	0,04	7,95
vc²	0,14	1,00	0,14	1,77	0,24	1,77
meio²	1,66	1,00	1,66	21,40	0,01	21,39
ap*vc	2,79	1,00	2,79	36,08	0,00	36,07
ap*meio	0,37	1,00	0,37	4,75	0,08	4,75
vc*meio	0,37	1,00	0,37	4,83	0,08	4,83
Erro	0,38	5	0,07			
				R² = 94,05%		